

ARCHIVOS DE INGENIERÍA BIOQUÍMICA  
VOLUMEN II

AVANCES EN  
BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL:  
*Tratamiento de Residuos  
Líquidos y Sólidos*

**EDITOR GENERAL**

Dr. ROLANDO CHAMY M.

**EDITORES**

Dr. JULIÁN CARRERA M.

MSc. DAVID JEISON N.

MSc. GONZALO RUIZ F.



EDICIONES UNIVERSITARIAS DE VALPARAÍSO  
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del «Copyright», bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos.

© Rolando Chamy M., Editor General, 2003  
Inscripción N° 133.083

ISBN 956-17-0341-6

Tirada de 300 ejemplares

Derechos Reservados

**Ediciones Universitarias de Valparaíso**  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso  
Calle 12 de Febrero 187, Valparaíso  
Fono (32) 273087 - Fax (32) 273429  
E.mail: [euvsa@ucv.cl](mailto:euvsa@ucv.cl)  
[www.euv.cl](http://www.euv.cl)

Diseño Gráfico: Guido Olivares S.  
Diagramación: Paulo Soza  
Corrección de Pruebas: Osvaldo Oliva P.

Impreso en Salesianos S.A.

HECHO EN CHILE

# AVANCES EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL:

*Tratamiento de Residuos Líquidos y Sólidos*

## **EDITOR GENERAL:**

Dr. ROLANDO CHAMY M.

## **EDITORES:**

Dr. JULIÁN CARRERA M.

MSc. DAVID JEISON N.

MSc. GONZALO RUIZ F.

## **AUTORES:**

Dr. JOSÉ LUIS CAMPOS G.

Departamento de Ingeniería Química,  
Universidad de Santiago de Compostela, España

Dr. JULIÁN CARRERA M.

Departamento de Ingeniería Química,  
Universidad Autónoma de Barcelona, España

Dr. ROLANDO CHAMY M.

Escuela de Ingeniería Bioquímica,  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile

MSc. DAVID JEISON N.

Escuela de Ingeniería Química,  
Universidad de la Frontera, Temuco, Chile

Dr. VINKA OYANEDEL B.

Departamento de Ingeniería Química,  
Universidad de Santiago de Compostela, España

MSc. PAOLA POIRRIER G.

Departamento de Ingeniería Química,  
Universidad de Santiago de Compostela, España

Dr. ENRIQUE ROCA B.

Departamento de Ingeniería Química,  
Universidad de Santiago de Compostela, España

MSc. GONZALO RUIZ F.

Departamento de Ingeniería Química,  
Universidad de Santiago de Compostela, España

Dr. MARCEL SZANTÓ N.

Escuela de Ingeniería en Construcción,  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile

Dr. M<sup>a</sup> ELVIRA ZÚÑIGA H.

Escuela de Ingeniería Bioquímica,  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile



# ÍNDICE

**PRÓLOGO** ..... Pág. 9

**Capítulo 1**

BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL:

*tecnología de punta para un desarrollo sustentable*

Rolando Chamy M. y David Jeison N. .... 13

**Capítulo 2**

REMOCIÓN BIOLÓGICA DE MATERIA ORGÁNICA

Rolando Chamy M., Vinka Oyanedel B.,

David Jeison N. y José Luis Campos G. .... 27

**Capítulo 3**

REMOCIÓN BIOLÓGICA DE NUTRIENTES

Julián Carrera M. .... 115

**Capítulo 4**

TRATAMIENTO DE AGUAS CON ALTO

CONTENIDO DE AZUFRE

David Jeison N. y José Luis Campos G. .... 173

**Capítulo 5**

TRATAMIENTO ANAEROBIO DE RESIDUOS SÓLIDOS

Paola Poirrier G., Rolando Chamy M. y

Marcel Szantó N. .... 199

**Capítulo 6**

INSTRUMENTACIÓN, MONITORIZACIÓN Y CONTROL

Gonzalo Ruiz F. y Enrique Roca B. .... 247

**Capítulo 7**

TECNOLOGÍAS LIMPIAS Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS

Rolando Chamy M., María Elvira Zúñiga H., y

David Jeison N. .... 317

## PRÓLOGO

La preservación del medio ambiente representa uno de los mayores desafíos para la humanidad al iniciarse el siglo XXI. El acelerado desarrollo tecnológico, en respuesta a las crecientes demandas y expectativas del hombre, junto al acelerado crecimiento de la población, producen una enorme presión sobre nuestro ambiente, que se traduce en niveles cada vez mayores de contaminación. Se ha llegado incluso a plantear que, de continuar el acelerado ritmo de crecimiento observado en la segunda mitad del siglo XX, nuestro planeta podría sucumbir en un plazo imaginable, a consecuencia del agotamiento y contaminación de sus recursos. Afortunadamente, el hombre ha demostrado, históricamente, su extraordinaria capacidad de resolver las encrucijadas que le plantea su propio desarrollo. Así, la contaminación ambiental puede ser hoy enfrentada con el aporte de la tecnología que en gran medida es responsable de ella. La preservación ambiental, sin embargo, es un desafío tan grande que requiere no sólo de soluciones tecnológicas, sino de propuestas educacionales, jurídicas y sociales que comprometan a todos los actores sociales.

La contaminación ambiental es una preocupación principal en nuestra sociedad de hoy, afectando seriamente las condiciones de vida. El problema de la contaminación se hace más dramático en países subdesarrollados que, aunque contaminan menos que los países desarrollados, deben compatibilizar los sacrificios de su sistema productivo con el cuidado de su medio ambiente debido a que sus economías son débiles. Un ejemplo de lo anterior es que las ciudades más contamina-

das del mundo se encuentran dentro de los países denominados del tercer mundo. Al revés, los países desarrollados que más contaminan son los que disponen de más recursos para combatir la contaminación.

El tema del medio ambiente está íntimamente relacionado con los sistemas biológicos, por cuanto los seres vivos, aparte de ser componentes principales del medio ambiente natural, ofrecen interesantes opciones para su preservación. La biotecnología, que es la explotación de los sistemas biológicos (seres vivos o sus principios activos) para fines productivos, contribuye doblemente a la preservación del medio ambiente al ofrecer alternativas tecnológicas ambientalmente amigables para la producción de bienes de consumo y ofrecer sistemas de remoción de contaminantes mediante su transformación en sustancias inofensivas.

En este contexto la biotecnología ambiental juega un papel relevante en la protección del medio ambiente. La **biotecnología** puede ser definida como la aplicación de los principios de las ciencias y de la ingeniería al procesamiento de materiales mediante agentes biológicos. Se la define también como la explotación y control de sistemas biológicos para propósitos tecnológicos. Como lo sugiere su etimología, hay dos componentes básicos del concepto: el de **bio**, esto es, la participación de agentes biológicos y el de **tecnología**, esto es, la aplicación del conocimiento para la generación de bienes y servicios.

Como se ha señalado, una adecuada estrategia de preservación ambiental requiere de un enfoque multidisciplinario. La biotecnología, dentro de este enfoque, representa una respuesta adecuada en muchos casos.

Los bioprocesos de depuración de efluentes líquidos, tanto municipales como industriales, configuran lo que se denomina tratamiento secundario, que es donde se remueve efectivamente la carga contaminante producida por la materia orgánica. Los bioprocesos, más que cualquier otro sistema de tratamiento, producen una verdadera depuración, en el sentido de convertir sustancias contaminantes en inocuas, y no ser una mera transferencia del contaminante a un sitio de menor impacto. Algo similar puede señalarse respecto de los bioprocesos de depuración de residuos sólidos. En el tratamiento de efluentes gaseosos, el aporte de la biotecnología es limitado, aunque recientemente se

han desarrollado sistemas muy eficaces para la biodepuración de efluentes gaseosos industriales.

El reciclaje y revaloración de residuos mediante bioprocesos es otra estrategia de enorme relevancia, especialmente en el caso de residuos industriales, donde representa un incentivo para la empresa, que de ese modo puede absorber los costos de tratamiento y eventualmente generar ingresos marginales.

La recuperación de tierras dañadas por la contaminación (**remediación**) es un tema de enorme relevancia actual. Dentro de las opciones de recuperación, los sistemas biológicos (**bioremediación**) están siendo estudiados con buenas perspectivas y ya se encuentran en aplicación en algunos países.

Finalmente, debe destacarse que los bioprocesos representan en sí una opción tecnológica de menor impacto ambiental relativo para la producción de bienes de consumo, ya que se trata de procesos realizados en condiciones ambientales suaves y que por lo general no involucran sustancias tóxicas o de difícil degradación. En este contexto, la biotecnología puede ser considerada una **tecnología limpia y que limpia**.

Me es extraordinariamente grato presentar este libro, que se genera en el seno de una institución pionera en el desarrollo de la Biotecnología Ambiental, y que contiene una visión de los últimos avances que se han desarrollado en el tema, tanto en tratamiento de residuos sólidos como líquidos. Este libro representa la culminación del destacable aporte que han hecho sus autores aplicando los procesos de digestión anaerobia al control ambiental, tanto en Chile como en Latinoamérica.

ALEX CHECHILNITZKY Z.  
PRESIDENTE  
ASOCIACIÓN INTERAMERICANA DE  
INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL  
CAPÍTULO CHILENO



**Capítulo 1**  
**BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL:**  
*tecnología de punta para un desarrollo sustentable*

Rolando Chamy M.  
David Jeison N.

El desarrollo económico-social es en su esencia un proceso de transformación del ambiente natural y, como tal, implica un factor de interferencia con éste y con las leyes naturales que lo rigen. Importante es, entonces, mantener un balance apropiado entre lo deseable para el desarrollo y lo necesario para la mantención del equilibrio ecológico. Por ejemplo, el agua es factor de desarrollo y está ampliamente reconocido y demostrado que un plan de manejo del recurso constituye la base de cualquier planificación territorial que contemple el desarrollo en términos generales, conservando las exigencias de protección del medio ambiente.

Los problemas ambientales se originan, generalmente, porque se planifica el desarrollo económico-social sin considerar el impacto en el medio ambiente que conlleva este desarrollo.

Esta preocupación por el medio ambiente se ha vinculado al desarrollo de la ciencia y la tecnología y ha tenido un crecimiento espectacular. La investigación y el desarrollo de procesos adecuados para la conservación del medio ambiente, ya sea en el tratamiento de residuos sólidos, líquidos o gaseosos, han aportado soluciones claras a algunos problemas y permiten entrever en otros casos soluciones tecnológicamente posibles a un costo relativamente bajo.

En la vida cotidiana siempre se han asociado los microorganismos con contaminación y enfermedades. Sin embargo, existe una gran cantidad de microorganismos beneficiosos, que dada su gran variabilidad y versatilidad pueden solucionar los graves problemas de contami-

nación. De hecho, la biotecnología tiene resueltos prácticamente todos los problemas ambientales, lo que falta es la voluntad y muchas veces los medios para encarar los problemas de una manera adecuada.

En este capítulo se hará un pequeño resumen de los diferentes roles que tienen los procesos biológicos en el control de la contaminación.

## **1. TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE EFLUENTES LÍQUIDOS**

### **1.1. Aspectos generales**

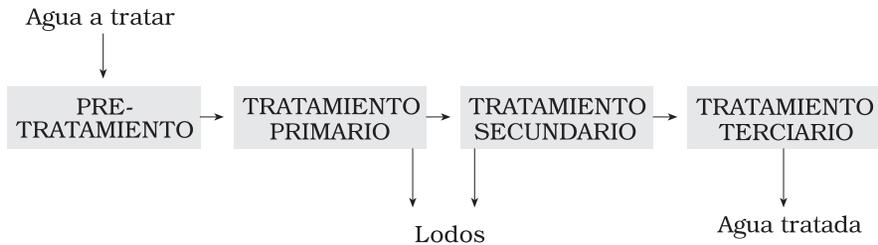
Los efluentes líquidos se pueden clasificar de diversas formas, sin embargo lo clásico es hacerlo de acuerdo a su procedencia (agraria, industrial y urbana). Las aguas de tipo agrario están compuestas fundamentalmente de estiércol y restos de abono, siendo los contaminantes más importantes los sólidos en suspensión y disueltos, de los cuales destacan los fertilizantes. Las aguas de tipo urbano están compuestas fundamentalmente de residuos orgánicos y productos de lavado, siendo los contaminantes más importantes las grasas y aceites, la materia orgánica en general y los microorganismos patógenos. Las aguas industriales en cambio son de contenido muy variable y dependiente del proceso productivo, lo que impide su generalización en cuanto a tratamiento y carga contaminante.

El problema característico de las aguas industriales es que, mientras los vertidos urbanos convencionales presentan impurezas minerales y orgánicas cuya naturaleza y concentración son bastante similares de una ciudad a otra, por lo que sus líneas de tratamiento pueden ser análogas, los vertidos industriales, debido a su gran diversidad, necesitan de una investigación propia para cada tipo de industria y la aplicación de procesos de tratamiento específicos. Así, es necesario para encontrar el proceso adecuado, realizar estudios de tratabilidad de aguas residuales, que se diseñan con el objetivo de conocer la capacidad de eliminación de contaminantes por medio de uno o varios procesos de tratamiento, y a la vez acondicionar el efluente a los valores permisibles de carga orgánica y otros elementos contaminantes, para su vertido a los cursos receptores de agua. Esto que parece tan lógico, raramente es realizado y es causa de innumerables fracasos en los sistemas de tratamiento.

Los tratamientos de efluentes líquidos incluyen tres categorías de tratamiento:

- Tratamiento físico o primario
- Tratamiento biológico o secundario
- Tratamiento químico o terciario

Por razones técnicas y económicas, los tratamientos físico-químicos son aplicados en aguas con sólidos suspendidos, contaminantes inorgánicos o con materia orgánica no biodegradable, mientras que los segundos se utilizan cuando los principales contaminantes son biodegradables. La Figura 1 muestra una secuencia general de un tratamiento para un efluente industrial, mientras que la Tabla 1 indica los niveles de remoción alcanzados en los tratamientos primarios, secundarios y terciarios.



**Figura 1.** Esquema general de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales.

La selección de los procesos de tratamiento de aguas residuales, o la serie de procesos de tratamiento, dependen de un cierto número de factores, entre los que se incluyen:

- Características del agua residual: DBO, DQO, materia en suspensión, pH, productos tóxicos.
- Calidad del efluente de salida requerido.
- Costo y disponibilidad de terrenos.
- Consideración de las futuras ampliaciones o la previsión de límites de calidad de vertido más estrictos, que necesiten el diseño de tratamientos más sofisticados en el futuro.

**Tabla 1.** Niveles de remoción de los contaminantes según sea el tratamiento.

	Tratamiento (% remoción)		
	primario	secundario	terciario
<b>DBO</b>	35	90	99.99
<b>DQO</b>	30	80	99.8
<b>SS</b>	60	90	
<b>N</b>	20	50	99.5
<b>P</b>	10	60	variable

### 1.2. Tratamiento secundario

El tratamiento secundario es el encargado de reducir la DBO de las aguas residuales, ya sean industriales o urbanas a través de mecanismos biológicos. Dichos mecanismos consisten en la asimilación de la materia orgánica degradable biológicamente (DBO) por los microorganismos. Dependiendo si estos procesos ocurren en presencia o ausencia de oxígeno se tendrán tratamientos biológicos aerobios o anaerobios.

En general, en un tratamiento de tipo secundario se debe tener un criterio de operación diferente al que se toma en una fermentación industrial. En esta última, se debe tratar de obtener del sustrato un alto rendimiento en biomasa producida, mientras que en los tratamientos de efluentes se debe minimizar este rendimiento.

Como característica básica, los sistemas secundarios son sistemas biológicos con microorganismos heterogéneos que normalmente presentan bajas velocidades específicas de crecimiento, y que deben tratar un sustrato, también heterogéneo, en grandes volúmenes de operación. Normalmente es un sistema continuo y en la generalidad de los casos es poco controlado. Estos tratamientos biológicos se analizarán más en detalle en los capítulos siguientes.

### 1.3. Tratamiento terciario

Este tipo de tratamiento se aplica para la eliminación de contaminantes concretos, que no han sido eliminados en el tratamiento primario ni en el secundario (por ejemplo, el nitrógeno y el fósforo), como también en el caso de efluentes que, aún después del tratamiento secundario, siguen presentando elevados niveles de DQO y DBO, o incluso

para reciclar el agua tratada en la red domiciliaria.

Este tratamiento terciario será más o menos intensivo en función de la utilización final del efluente. En algunos casos se puede utilizar distintos sistemas de desinfección y regeneración, cuando el agua vaya a ser reutilizada, ya sea para regadío o bien para consumo humano o animal.

Dentro de los tratamientos terciarios de tipo biológico es quizás la eliminación del nitrógeno uno de los más importantes. Entre ellos, la nitrificación-denitrificación presenta una mínima producción de lodos, una eliminación eficaz de los contaminantes y un costo relativamente bajo.

La nitrificación es un proceso efectuado por las bacterias nitrificantes, que son aerobias, quimiolitótrofas obligadas. El proceso de nitrificación tiene lugar en dos fases. En la primera, el amoníaco es oxidado a nitrito por la acción de bacterias amonio oxidantes y en la segunda, el nitrito es oxidado a nitrato por bacterias nitrito oxidantes. Ambas bacterias son autótrofas, pero mientras las nitrito oxidante son facultativas, las amonio oxidante son obligadas. Una característica interesante de la estructura de las bacterias nitrito oxidante es la presencia de varias membranas con doble capa que envuelven completamente el interior de la célula. El nitrato que penetra en la célula se oxida sobre estas membranas y no puede penetrar en el interior en donde podría ejercer efectos tóxicos.

La desnitrificación biológica es un proceso por el cual ciertos tipos de microorganismos reducen el nitrato y el nitrito a nitrógeno gaseoso, junto con la oxidación de un compuesto orgánico a dióxido de carbono. Esto se produce en un medio anóxico, en el cual los nitratos y nitritos actúan como aceptores de electrones, al no disponer de oxígeno en el medio. Por ello, es también necesaria la presencia de algún compuesto oxidable que actúe como fuente de electrones, que puede ser la materia orgánica remanente o bien debe ser exógena, habitualmente metanol.

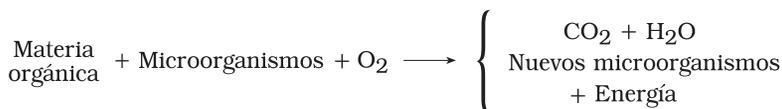
## **2. TRATAMIENTO AEROBIO DE EFLUENTES LÍQUIDOS**

Los tratamientos aerobios son los tratamientos secundarios que disponen de un mayor número de instalaciones, esto porque antes de la

aparición de los digestores anaerobios de segunda generación (años 80), los tiempos de retención hidráulicos eran entre 15 y 30 veces menores que en el tratamiento anaerobio. Por otra parte, al existir un gran número de instalaciones funcionando, el sistema aerobio se ha seguido prefiriendo por ser algo probado.

En un sistema aerobio se produce una gran cantidad de biomasa que genera un problema adicional de contaminación, ya que se debe disponer no sólo de un sistema para el tratamiento de las aguas sino que también para la disposición final de los lodos.

La asimilación de materia orgánica ocurre de acuerdo con la siguiente reacción:



Los tratamientos aerobios se pueden clasificar en tratamientos con biomasa suspendida y tratamientos con biomasa fija. Entre los primeros, los más importantes son los lodos activados y las lagunas aireadas, y entre los con biomasa fija se cuentan los mal llamados “filtros percoladores” y los contactores biológicos rotatorios.

### 2.1. Lodos activados

El sistema de lodos activados consiste en desarrollar un cultivo bacteriano disperso en forma de flóculos (lodos activados) en un depósito agitado y aireado, y alimentado con el agua a depurar. Después de un tiempo de contacto suficiente, el licor de mezcla se envía a un clarificador (decantador secundario) destinado a separar el agua depurada de los fangos, un porcentaje de estos últimos se recirculan para mantener en el reactor una concentración de biomasa activa elevada. El fango residual se extrae del sistema y se evacua al tratamiento de fangos, lo que no siempre es posible de realizar, fundamentalmente por problemas de espacio.

Básicamente, es una unidad fermentativa con recirculación de células. Esto permite operar a velocidades de dilución mayores que el valor correspondiente a la velocidad específica máxima de crecimiento de los microorganismos. En otras palabras, se tienen tiempos de

retención de lodos superiores al tiempo de retención hidráulico.

El sistema tradicional es un sistema prácticamente de mezcla completa, con tasas de recirculación que van entre 1:1 a 1:12. Existen otras opciones que consisten en una aireación escalonada o una estabilización por contacto. En el sistema de aireación escalonada se introduce el agua residual en distintos puntos del estanque de aireación, el cual se subdivide por medio de deflectores en cuatro canales paralelos, o más. Cada canal es una fase o escalón individual y las distintas fases se conectan entre sí en serie. En el proceso de estabilización por contacto la eliminación de la carga orgánica tiene lugar en dos etapas: una primera de absorción en el fango de la mayor parte de las materias orgánicas coloidales (≈ 30 minutos) y una segunda en donde son degradados los contaminantes antes absorbidos.

Otra variable del sistema son las zanjas de oxidación. En este caso, el efluente circula a gran velocidad a través de un largo recorrido logrando una gran aireación superficial. Este sistema requiere de una mayor disponibilidad de terreno, pero presenta una menor producción de lodos y un menor costo de construcción y mantenimiento.

## **2.2. Filtros Aerobios**

Los mal llamados filtros aerobios, filtros percoladores o biofiltros son en realidad reactores de lecho fijo con masa microbiana inmovilizada sobre la superficie de un soporte sólido, que en la mayoría de los casos está constituido por piedras. El nombre de biofiltro ha hecho cometer innumerables errores en el manejo del proceso, ya que se piensa que la depuración tiene lugar a través de un proceso de filtración y no por una transformación biológica de la materia orgánica mediante la acción de microorganismos. El principal problema es que se opera a velocidades de dilución mayores a las adecuadas, consiguiéndose eficiencias de depuración menores.

El agua es alimentada por goteo o por aspersión sobre el lecho, el cual no está inundado y por tanto no es necesaria una aireación adicional. El tamaño de los orificios debe ser tal que no se provoque un fenómeno de filtración. En la superficie del soporte se adhiere la masa microbiana conformada principalmente por bacterias, existiendo además hongos, algas y protozoos. Se establecen dos zonas, una aerobia que está en contacto directo con el exterior y una anaerobia que se

ubica entre la capa aerobia y la superficie del soporte. La acumulación de masa microbiana sobre el soporte hace que periódicamente ésta se desprenda, necesitándose por tanto una unidad de sedimentación luego del biofiltro. Últimamente, se están usando con mayor frecuencia otros tipos de soporte, distintos a las piedras, los cuales presentan una mayor superficie por unidad de volumen y por tanto requieren un menor volumen de reactor para igual eficiencia de tratamiento.

### **2.3. Contactores biológicos rotatorios**

Los contactores biológicos rotatorios (CBR) consisten en una serie de discos circulares, generalmente de tipo plástico, ubicados muy cerca uno de otro, con un diámetro típico de 3.6 metros y dispuestos sobre un eje horizontal que rota lentamente. Aproximadamente el 40 % del disco está sumergido en un estanque que contiene el agua a tratar, de tal manera que la película de biomasa que crece sobre la superficie de los discos está alternadamente dentro y fuera del agua mientras el CBR rota. Cuando los microorganismos están sumergidos en el interior del efluente, absorben la materia orgánica y cuando están en la superficie consumen el oxígeno que requieren. Si bien estos equipos dispuestos en serie entregan mejores rendimientos, no son muy utilizados ya que presentan problemas de tipo mecánico. Son recomendados cuando la carga volumétrica es variable ya que es más sencillo, en comparación con los biofiltros, mantener la película húmeda. Las ventajas de este reactor son: capacidad para resistir a los «shock» de cargas, tiempos de retención hidráulica cortos, bajos requerimientos de potencia, y construcción y operación simples.

Los CBR proveen un método excepcionalmente suave de inmovilización natural para los hongos filamentosos, ya que estos últimos pueden exhibir una fuerte afinidad por las superficies de cualquier material (orgánico o inorgánico). La adherencia y la colonización superficial son características importantes de la adaptación natural de estos microorganismos. También existen varios métodos disponibles para la inmovilización artificial de células, siendo la adsorción y el atrapamiento los más extensamente usados para hongos filamentosos. Las esporas inactivas o pregerminadas han probado ser un adecuado inóculo para los CBR, ya que éstas se unen fácilmente a las superficies de los discos e inician el crecimiento de la película.

### **3. TRATAMIENTO ANAEROBIO DE EFLUENTES LÍQUIDOS**

#### **3.1. Antecedentes Generales**

La digestión anaerobia es uno de los mecanismos más frecuentemente utilizados por la naturaleza para degradar las sustancias orgánicas. De hecho, esta conversión se produce en diversos ambientes, ya sean naturales, como los sistemas gastrointestinales (rumen), los sedimentos marinos de los ríos y lagos, las fuentes termales, los volcanes, o bien en sistemas controlados como los digestores o fermentadores anaerobios. Este proceso biológico se basa en la transformación, a través de una serie de reacciones bioquímicas, de la materia contaminante en un gas cuyos componentes principales son el  $\text{CH}_4$  y el  $\text{CO}_2$  (biogás).

El biogás producido puede ser recogido y usado como combustible. De esta forma, la digestión anaerobia como método de tratamiento de residuos, permite disminuir la cantidad de materia orgánica contaminante y, al mismo tiempo, producir energía. El que uno de estos dos objetivos predomine sobre el otro depende de las necesidades de descontaminación del medio ambiente y de la naturaleza y origen del residuo.

Tradicionalmente, ha venido usándose la digestión anaerobia en la estabilización de los lodos producidos en la depuración aerobia de aguas residuales. Pero en los últimos años, consideraciones energéticas y el desarrollo de nuevas tecnologías han hecho posible la aplicación de los procesos anaeróbicos al tratamiento directo de aguas residuales.

Desde un punto de vista de balance energético el proceso de digestión anaerobia, en contraste con un sistema convencional de tratamiento aerobio, presenta grandes ventajas. Este último necesita una gran cantidad de energía para la aireación y entre un 40 al 60 % de la materia orgánica (expresada como Demanda Química de Oxígeno) es convertida a lodos, que han de ser estabilizados, mientras que en el sistema anaerobio, sólo se obtiene un 10 por ciento de la materia orgánica como lodos estables, lo que además implica un menor requerimiento de nutrientes.

#### **3.2. Tecnologías Anaerobias Disponibles**

Los digestores anaerobios pueden clasificarse, al igual que en el caso de los reactores aerobios en sistemas con biomasa suspendida y en

sistemas con biomasa fija, los que se indican en la Tabla 2. Por otro lado, también es común clasificarlos como de primera y segunda generación, siendo estos últimos aquellos que permiten un tiempo de retención de sólidos superior al tiempo de retención hidráulico. Estos últimos digestores son los que han permitido el explosivo aumento en el número de unidades anaerobias construidas para el tratamiento de aguas residuales (ver Capítulo 2).

**Tabla 2.** Reactores anaerobios de biomasa suspendida y fija.

<b>Biomasa Suspendida</b>	<b>Biomasa Fija</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>· Por lotes</li> <li>· Digestión Seca</li> <li>· RCTA</li> <li>· Contacto</li> <li>· UASB</li> <li>· EGSB</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Filtro anaerobio</li> <li>· Película fija</li> <li>· Lecho expandido</li> <li>· Lecho fluidizado</li> </ul>

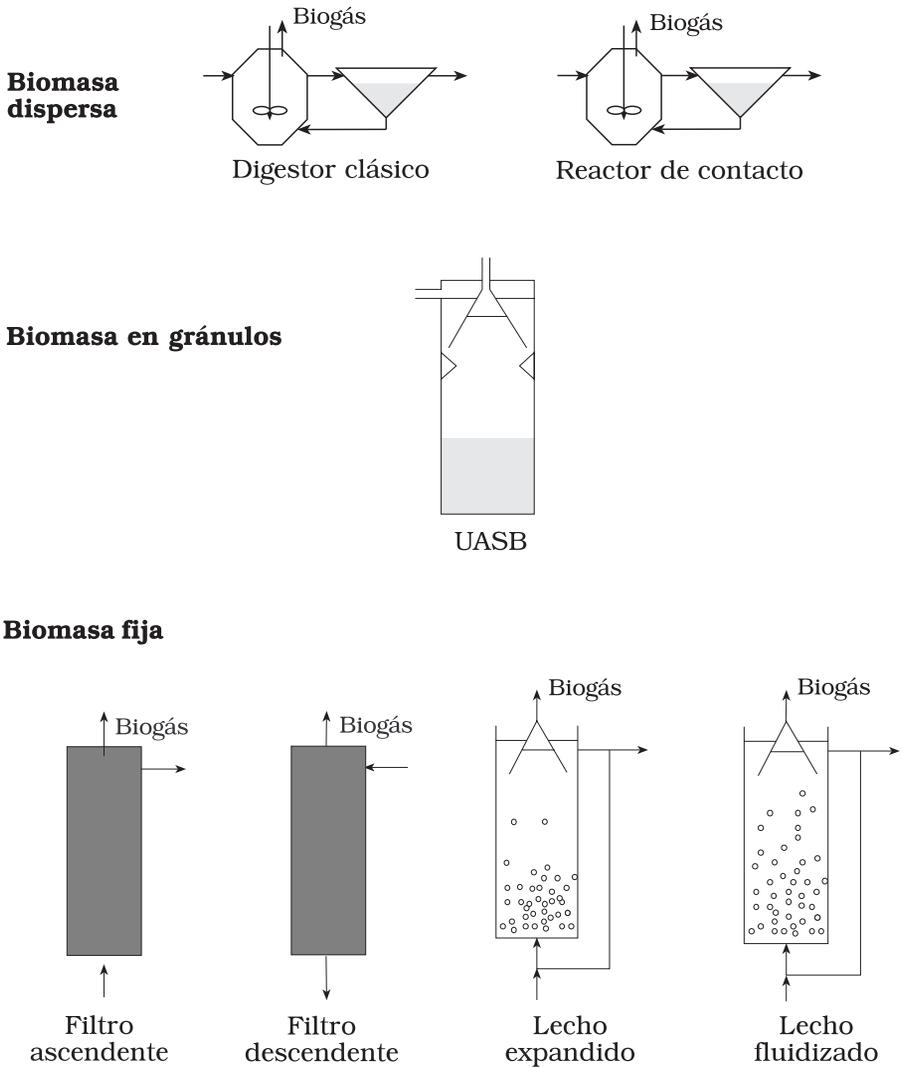
Se consideran como reactores anaerobios de segunda generación al de contacto anaerobio, los reactores granulares, más todos los que emplean sistemas de biomasa fija con excepción de los lechos fluidizados y expandidos que algunos autores los consideran como de tercera generación.

La Tabla 3 compara los distintos sistemas anaerobios y aerobios en cuanto a los parámetros operacionales más importantes, mientras que la Figura 2 esquematiza los diferentes reactores.

Todas las configuraciones de reactores anaerobios de alta carga o de segunda generación han sido utilizadas a gran escala. Se han logrado, con efluentes industriales, procesar mayores cargas volumétricas con mayores niveles de depuración que las obtenidas en los sistemas aerobios tradicionales.

**Tabla 3.** Parámetros operacionales de reactores aerobios y anaerobios.

	<b>Procesos Anaerobios</b>				<b>Procesos Aerobios</b>	
	<b>RTCA</b>	<b>Contacto</b>	<b>Filtro</b>	<b>UASB</b>	<b>Lodos Act.</b>	<b>Biofiltro</b>
VCO (kgDQO/m <sup>3</sup> .d)	0,5 - 3	2 - 8	2 - 10	1 - 15	0,5 - 2	1 - 3
TRH (d)	> 8	0,2 - 8	0,2 - 4	0,2 - 8	1 - 5	0,05 - 0,2
TRS (d)	> 8	1,5 - 8	20 - 300	30 - 300	10 - 30	> 30
T(°C)	35 - 55	35 - 55	15 - 35	15 - 35	15 - 25	15 - 25
Remoción (% DQO)	60	> 90	> 90	> 90	> 90	50 - 80



**Figura 2.** Reactores anaerobios de biomasa suspendida y fija.

## 4. TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE RESIDUOS SÓLIDOS

### 4.1. Aspectos generales sobre la recuperación y utilización de residuos

Las diversas formas de utilización de los residuos se pueden clasificar en cuatro grandes categorías, tal como se muestra en la Tabla 4. El término desecho orgánico incluye el concepto de residuo biológico. Los residuos orgánicos comprenden todo material formado por moléculas orgánicas, como los plásticos, fenoles, fracciones de petróleo (derrames), vegetales, microorganismos, efluentes de la industria alimentaria, aguas servidas y otros, sean éstos líquidos o sólidos.

**Tabla 4.** Clasificación del tratamiento de los residuos.

Tipo de Tratamiento	Ejemplo
t. biológico de residuos orgánicos	biogás, proteína unicelular
t. no biológico de residuos orgánicos	incineración, fabricación materiales de construcción.
t. biológico de residuos inorgánicos	lixiviación bacteriana de escorias
t. no biológico de residuos inorgánicos	reciclaje de metales orgánicos

Algunos de los objetivos que se pueden alcanzar mediante una adecuada utilización de los residuos se enumeran en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Objetivos de la utilización de los desechos

Objetivo	Ejemplo
Disminución de la carga contaminante	Relleno sanitario
Aprovechamiento energético	Biogás
Obtención de moléculas	Etileno
Producción de alimentos	Proteína unicelular

A partir de un residuo determinado se puede conseguir alcanzar uno o varios de los objetivos simultáneamente. Por ejemplo el compostaje de la fracción de origen biológico de los desechos urbanos sólidos permite reducir la carga contaminante y al mismo tiempo obtener un

fertilizante; otro ejemplo es la digestión anaerobia la cual permite reducir el nivel de contaminación, obtener energía y un sólido estabilizado que sirve como enriquecedor de suelos.

Un punto muy importante es establecer si un material específico se puede considerar un residuo o no. Muchas sustancias que en primera instancia se califican como «residuos» de un cierto proceso o actividad, un análisis más profundo revela que tienen diversos usos y por ende un costo significativo; por lo tanto no son desechos sino más bien subproductos. Ejemplo de esto, es el caso de la coseta agotada de remolacha que se utiliza como forraje de ganado y como elemento en materiales de construcción.

Una situación similar es la del bagazo de caña que se ocupa como combustible en los ingenios azucareros. Esto significa que todo proceso que se proponga para utilizar estos «residuos» tendrá que ofrecer claras ventajas prácticas y económicas.

También hay que tomar en cuenta que aunque hoy, un residuo sea realmente un desperdicio y no tenga uso alguno, en el momento en que comience a ser requerido como materia prima para algún proceso, rápidamente adoptará un valor en el mercado.

En el futuro, cuando exista un mayor conocimiento y capacidad tecnológicas y se utilice en mayor proporción los recursos renovables producidos en la tierra y el mar, quizás ya no se hable de desechos, sino que a lo más de productos primarios y secundarios, todos ellos fluyendo en una malla de reciclaje más eficiente y armónica.

#### **4.2. Tratamiento de residuos orgánicos**

Las alternativas de aprovechamiento de los residuos orgánicos se pueden clasificar en tres grupos: transformaciones termoquímicas, recuperación directa de productos por procesos físicos y biodegradación enzimática o microbiana; esto último equivale al tratamiento biológico de residuos orgánicos. La decisión de cuál proceso utilizar y qué producto o productos obtener deberá basarse en una evaluación técnico-económica del residuo específico de que se trate.

#### **4.3. Tratamiento de residuos inorgánicos**

Existen numerosos métodos para el aprovechamiento por sistemas

químicos y físicos de materia inorgánica, que no corresponde tratar en esta publicación. En el caso del tratamiento biológico de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales (basura) conviene estar familiarizado con los métodos de separación mecánico de los diversos tipos de materiales que la componen (metales, vidrios, papeles, cartones, restos de alimentos, géneros, madera).

Entre los tratamientos biológicos de material inorgánico está la lixiviación bacteriana de minerales de baja ley o a rípios resultantes de la explotación convencional de minerales. En todo caso, estos procesos son un campo de desarrollo que cada día cobra mayor relevancia en la biotecnología por sus grandes proyecciones en aquellos países que posean importantes yacimientos y faenas mineras, especialmente de cobre, oro y uranio.

#### **4.4. Rellenos Sanitarios**

Entre los profesionales dedicados al área de tratamiento de residuos existe el consenso de que los rellenos sanitarios son uno de los medios más adecuados para la disposición de los residuos sólidos urbanos (RSU). En la actualidad se considera a los Rellenos Sanitarios como una solución técnica, económica y sanitaria para disponer los residuos sólidos. A esta solución se llega después de muchos años durante los cuales se utilizaron otras metodologías de disposición, las que presentaban como común denominador una gran contaminación del medio ambiente. Chile, es junto con Brasil, pionero a este respecto en Latinoamérica, habiéndose más que duplicado el número de rellenos en los últimos 15 años.

El Relleno sanitariamente controlado es aquel en que se colocan los desechos, compactándolos para que ocupen el menor volumen posible y se les cubre al final de la jornada diaria o cuando sea necesario con una capa de tierra, para que no afecten el sistema ecológico o se constituyan en focos infecciosos.

En el fondo, un Relleno Sanitario es un gran digestor anaerobio en el cual se degrada la materia orgánica a metano y dióxido de carbono. Por tanto, junto con ser una buena solución para la disposición final de los residuos sólidos, permite aprovechar el biogás generado, ya sea para industrias cercanas o bien para el gas ciudad.